# 有机朗肯循环与吸附制冷串级连接的可行性研究

高鹏 宋分平 王丽伟 江龙 王如竹

（上海交通大学制冷与低温工程研究所，动力机械与工程教育部重点实验室，上海市闵行区东川路 800 号，上海 200240）

**摘 要** 提出了一种新型串级连接，即将有机朗肯循环（ORC）与氯化钙/氯化钡两级吸附式制冷机组串联起来。ORC 系统工质选为 R245fa，假设等熵效率与功电转化效率乘积为 0.4，当膨胀机进口压力从 0.6 Mpa 变化到 1.1 Mpa，能量效率、火用效率、发电量变化范围分别是 3.9%-5.5%、34%-31.5%、392 W-600 W，如果增加回热器后，能量效率从 4.2%变化到 6.0%；利用压缩空气模拟工质 R245fa 推动膨胀机，当进口压力为 1 MPa 时，膨胀机的等熵效率与功电转化效率乘积是 0.53，发电量为 300 W；两级吸附式制冷系统，当热源温度从 75℃变化到 95℃，制冷量、能量效率及火用效率变化范围分别是 1.42 kW-2.2 kW、13.4%-16.8%、18.1%-16.6%；有机朗肯循环与两级吸附制冷串连起来，热源温度为 98 ℃时，系统总的能量效率为 11.8%，火用效率为 23.7%，发电量为 560 W，制冷量是 2.2 kW。

**关键词** 有机朗肯循环；氯化钙/氯化钡两级吸附式制冷；串级连接；

# The feasibility research about cascaded connection between ORC with adsorption refrigeration

GAO Peng SONG Fenping WANG Liwei JIANG Long WANG Ruzhu

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, Key Laboratory For Machinery and Engineering Of MOE, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

**Abstract** A novel cascaded connection that Organic Rankine Cycle (ORC) with working fluid R245fa is connected to $CaCl_2/BaCl_2$ two stage adsorption refrigeration is proposed. Assumed that the product between isentropic efficiency and work-power efficiency is 0.4, the performance of ORC system is analyzed. When the inlet pressure of the expander change from 0.6 Mpa to 1.1 Mpa, energy efficiency, exergy efficiency and power generation are 5.5%-3.9%, 34%-31.5%, 392 W-600 W. If the internal heat exchanger is added, energy efficiency is from 4.2% to 6.0%. Compressed air that simulates the R245fa is used to drive expander, when the inlet pressure of expander is 1 MPa, the product between isentropic efficiency and work-power efficiency is 0.53, and power generation is 300 W. When the heat source temperature changes from 75 °C to 95 °C, cooling power, energy efficiency and exergy efficiency of $CaCl_2/BaCl_2$ two stage adsorption refrigeration are 1.42 kW-2.2 kW, 13.4%-16.8% and 18.1%-16.6%. When ORC is connected to two stage adsorption refrigeration and the temperature of heat source is 98 °C, the energy efficiency, exergy efficiency, power generation and cooling capacity of the total system are 11.8%, 23.7%, 560 W and 2.2 kW.

**Keywords** Organic Rankine Cycle(ORC); $CaCl_2/BaCl_2$ two stage adsorption refrigeration; Cascaded connection;

## 引言

近些年，随着能源危机和环境污染日益加重，人们越来越关注中低温品位的热源，如太阳能，地热能，工业废热等。而用中低温品味热源进行发电的技术如有机物朗肯循环，由于具有结构简单，工作压力低等优点，引起了广泛的研究[1,2]。同时吸附式制冷作为一种可以利用低品位热能驱动的绿色环保型技术，越来越受到研究者的重视[3,4]。

本文分为三部分：第一部分进行 ORC 系统的设计及理论计算;第二部分为氯化钙/氯化钡两级吸附式制冷;第三部分将 ORC 系统和氯化钙/氯化钡两级吸附式制冷系统串联起来，分析总的能量效率及火用效率。

## 1.有机朗肯循环（ORC）

### 1.1 ORC 系统的设计

有机朗肯循环是使用有机工质代替传统的水蒸汽的朗肯循环。ORC 系统（图 1）一般由蒸发器、过热器、膨胀机、冷凝器和循环泵等组成。循环工质在这些部件中不断进行等压加热、绝热膨胀、等压放热和绝热升压 4 个过程，使热能不断转化为机械能，再通过发电机将机械能转化为电能。

### 1.2 ORC 系统的理论计算及分析

设计计算的工质选为工质 R245fa，假设过热温度 95℃，压力 1 MPa，冷凝温度 30℃。假设等熵效率与功电转化效率乘积为 0.4，管道损失忽略不计，设定发电量为 560 W，则工质 R245fa 的质量流量是 0.0432 kg/s，膨胀机的进口体积流量是 2.86 $m^3$/h。

收稿日期：

基金项目：国家优秀青年科学基金项目(51222601)，上海市浦江人才计划，上海市科委国际合作项目(11160706000)

作者简介：高鹏（1988-），男，硕士，主要从事有机朗肯循环研究，通讯作者：王丽伟，教授，lwwang@sjtu.edu.cn

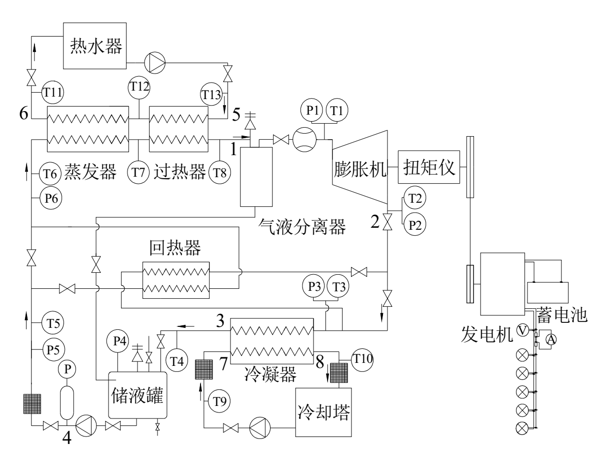



图 1 ORC 系统图

Fig.1 The system diagram of ORC

热水器给系统提供热量：

$$Q_{h1}=m_w c_w\left(T_{12}-T_{11}\right)\quad Q_{h2}=m_w c_w\left(T_{13}-T_{12}\right)\quad(1)$$

式中，$m_w$是水的质量流量（kg/s），实验室锅炉热水的流量是2.4 m$^3$/h，$c_w$是水的比热（kJ/（kg·℃））。设过热度为5℃，热源温度比过热温度高3℃，变化范围为78-98℃。

系统的能量效率

$$\eta_{ORC,energy}=\frac{W-W_{pu}}{Q_{h1}+Q_{h2}}\quad(2)$$

式中，$W_{pu}$是泵消耗的功（W）。

系统的热火用可以采用下面的公式来计算[5]：

$$E_{ORC}=Q\times\left(1-\frac{T_0}{T_{cs}}\right)=Q_{h1}\left(1-\frac{T_0}{T_{12}}\right)+Q_{h2}\left(1-\frac{T_0}{T_{13}}\right)\quad(3)$$

式中，$T_0$是环境温度（25℃），$T_{cs}$是平均温度。

火用效率：

$$\eta_{ORC,exergy}=\frac{W-W_{pu}}{E_{ORC}}\quad(4)$$

图 2 与图 3 是膨胀机进口压力对 ORC 系统发电量、能量效率、火用、火用效率的影响，当膨胀机进口压力从 0.6 Mpa 变化到 1.1 Mpa 时，发电量、能量效率及火用在不断的增加，而火用效率在不断下降。当进口压力是 1 Mpa 时，发电量、能量效率、火用、火用效率分别是 560 W、5.3%、1677 W、32%。系统的能量效率比较低，从 3.9%变化 5.5%。

考虑到工质 R245fa 在膨胀机出口温度比较高，所以在膨胀机出口和蒸发器入口增加了回热器，用于回收膨胀机出口气体的热量。图 4 给出了回热器对系统发电量、能量效率、火用、火用效率的影响，增加回热器不仅提高了系统的能量效率，而且还提高了系统的火用效率，如能量效率从 4.2%变化到 6.0%。

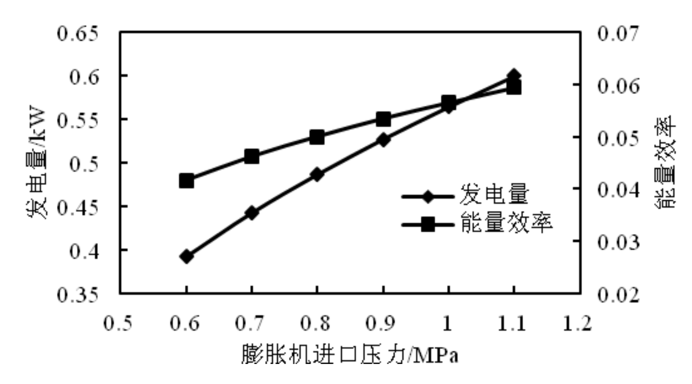



图 2 ORC 系统效率及发电量

Fig.2 The energy efficiency and power generation of ORC

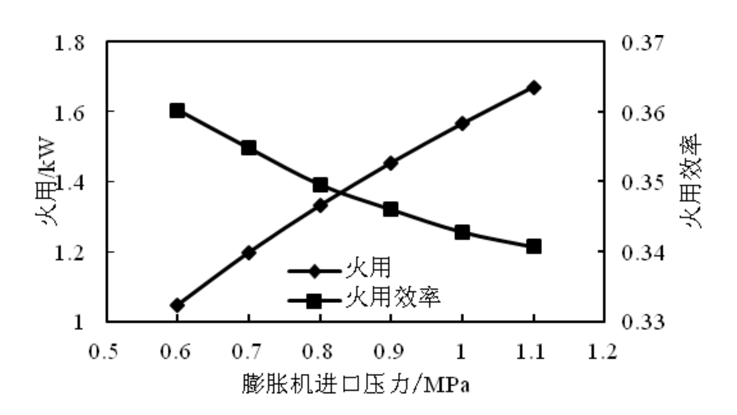



图 3 ORC 系统火用效率及火用

Fig.3 The exergy efficiency and exergy of ORC

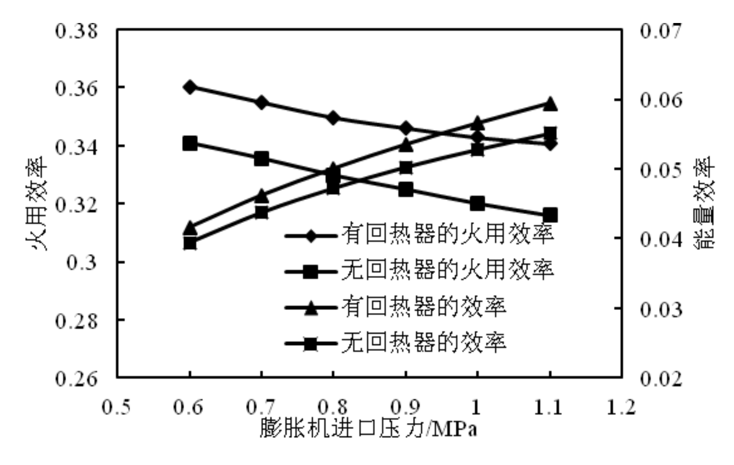



图 4 回热器对能量效率和火用效率的影响

Fig.4 The energy efficiency and exergy efficiency influenced by the internal heat exchanger

前面在 ORC 理论计算的时候，假设膨胀机等熵效率与功电转化效率的乘积为 0.4，而膨胀机作为 ORC 系统的关键部件，直接决定整个系统的效率，因此有必要对膨胀机的性能进行研究，下面利用压缩空气模拟工质 R245fa 对其性能进行研究。本实验采用涡旋式膨胀机。

### 1.3 涡旋膨胀的性能研究

涡旋式膨胀机是一种单向连续性多膨胀室的容积式膨胀机，适用于小流量、高膨胀比的场合。

利用高温高压空气推动膨胀机旋转做功发电进行模拟ORC中膨胀机的工况，即实验控制膨胀机进口温度、压力和出口压力与ORC理论计算中膨胀机工况相同。实验系统如图5所示，该实验台的主要设备包括空气压缩机、涡旋式膨胀机、发电机及负载。

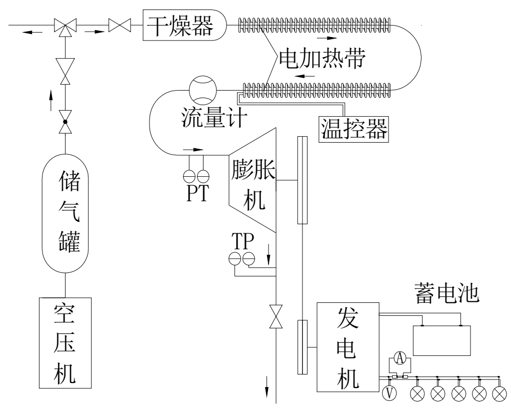



图 5 实验测试系统原理图

Fig.5 System schematic diagram of test unit

膨胀机理想输出的功：

$$W = m(h_1 - h_2) \tag{5}$$

式中 $m$ 为空气的质量流量（kg/s）； $h_1$、$h_2$ 分别为膨胀机进出口的焓值（kJ/kg）；

膨胀机的等熵效率

$$\eta_s = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}} \tag{6}$$

式中 $h_{2s}$ 为膨胀机等熵膨胀的终点焓（kJ/kg）；

膨胀机与发电机之间的功电转化效率

$$\eta_{en} = \frac{W_{out}}{W} = \frac{U \cdot I}{W} \tag{7}$$

式中 $W_{out}$ 为输出的电能，W；$U$ 和 $I$ 分别为电压和电流，V 和 A。

图 6 和图 7 为利用压缩空气模拟工质 R245fa 的实验结果，膨胀机进口压力从 0.6Mpa 变化到 1.1Mpa 时，等熵效率和功电转化效率分别维持在 60%、80%左右。当膨胀机进口的压力为 1 MPa 时，膨胀机等熵效率与功电转化效率的乘积是 0.53，尽管此时的发电量只有 300 W，但是在相同进出口压力条件下空气的焓差是远小于工质 R245fa 的焓差，如在 1Mpa 时，空气的进出口焓差是 85.45 kJ/kg，而 R245fa 的进出口的焓差是 263.11 kJ/kg，因此如果使用工质 R245fa 推动膨胀机，发电量将大于 300 W。

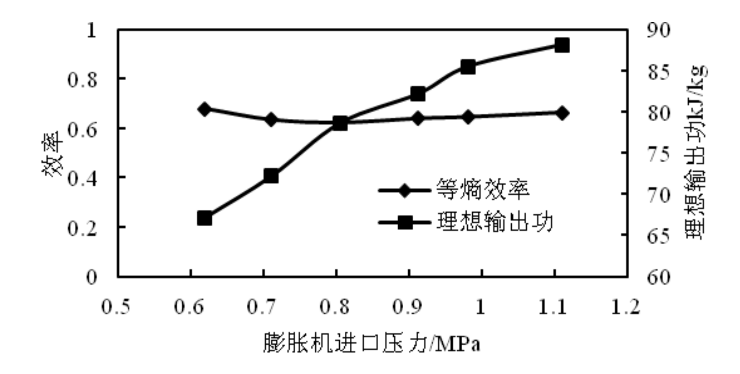



图 6 膨胀机等熵效率及理想输出功

Fig.6 Isentropic efficiency and ideal delivery work of expander

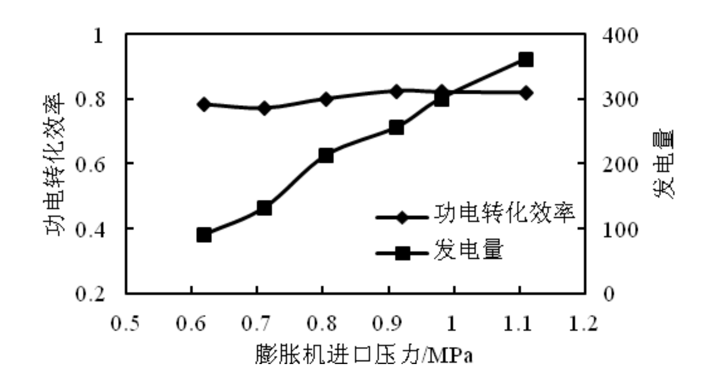



图 7 膨胀机的功电转化效率及对应的发电量

Fig.7 Conversion efficiency and power generation of expander

由于 ORC 系统的能量效率比较低，同时考虑到从蒸发器出来的水温还有较高的温度，如膨胀机进口压力从 0.6 Mpa 变化到 1 Mpa 时，水温从 74.5℃变化到 94.6℃，而此时的温度足以驱动氯化钙/氯化钡两级吸附式制冷机组[6]。这样可以提高系统总的能量利用效率。

## 2. 氯化钙/氯化钡两级吸附式制冷

### 2.1 两级吸附制冷的工作工程

两级吸附式制冷系统主要由中温盐吸附床、低温盐吸附床、冷凝器、蒸发器 4 个部分组成。系统中温盐与低温盐分别选取氯化钙/膨胀石墨与氯化钡/膨胀石墨复合吸附剂，氯化物与石墨的质量比 4:1，氯化钙与氯化钡的质量均为 6.5 kg，密度为 310 kg/m$^3$。冷凝器采用盘管式，蒸发器为两个流程的壳管式换热器。图 8 为两级吸附制冷系统简图。

工作过程：

（1）中温盐吸附床冷却吸附及蒸发器冷量输出过程。在此过程中，冷却水通过阀门 5 和 7 循环流动来冷却中温盐吸附床，吸附产生以后，工质氨在蒸

发器中蒸发，氨蒸汽被中温盐吸附。氨的蒸发会在蒸发器中蒸发吸热，产生冷量，用冷冻水将冷量带走。

（2）中温盐吸附床加热解吸和低温盐吸附床的冷却吸附过程。在此过程中，热水通过阀门 1 和 3 在中温床中循环流动给中温盐吸附进行加热，以便氨从中温床中解吸出来。冷却水通过阀门 6 和 8 在低温床中循环流动给低温盐吸附进行冷却，以便吸附从中温盐吸附床解吸出来的氨。

（3）低温盐吸附床加热解吸过程。在此过程中，热水通过阀门 2 和 4 在低温床中循环流动给低温盐进行加热，使得氨从低温床中解吸出来。冷却水在冷凝器中循环流动使冷凝器冷却，低温盐吸附床解吸出来的氨在冷凝器中冷凝并放出冷凝热。

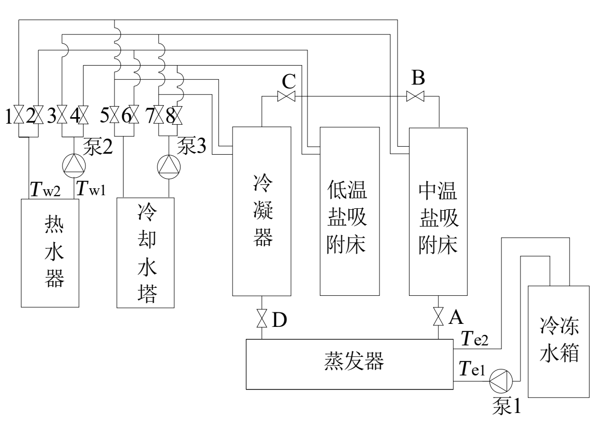



图 8 两级吸附制冷系统简图

Fig.8 Two stage adsorption system diagram

## 2.2 两级吸附制冷的模拟分析[7]

系统的加热量：

$$Q_{h3}=\frac{\int_0^{t_{cycle}} c_w.m_w.(T_{w1}-T_{w2})dt}{t_{cycle}} \quad (8)$$

式中 $t_{cycle}$ 是循环时间（s）;

系统的制冷量 $Q_{ref}$：

$$Q_{ref}=\frac{\int_0^{t_{cycle}} c_w.m_{w,eva}.(T_{e1}-T_{e2})dt}{t_{cycle}} \quad (9)$$

式中 $m_{w,eva}$ 蒸发器中冷冻水的质量流量（kg/s）；$T_{e1}$ 和 $T_{e2}$ 是冷冻水进口、出口温度（K）；

系统的能量效率：

$$\eta_{ref,energy}=\frac{Q_{ref}}{Q_{h3}} \quad (10)$$

冷量火用：

$$E_{ref}=Q_{ref}\cdot\left(\frac{T_0}{T_{e,average}}-1\right) \quad (11)$$

式中：$T_{e,average}$ 是冷冻水进出口平均温度（K）；

热量火用：

$$E_{Qh3}=Q_{h3}\cdot(1-\frac{T_0}{T_{h,average}}) \quad (12)$$

式中：$T_{h,average}$ 是热水进出口平均温度（K）；

系统火用效率：

$$\eta_{ref,exergy}=\frac{E_{ref}}{E_{Qh3}} \quad (13)$$

图 9 与图 10 为制冷量、能量效率、热量火用及火用效率随热源温度的变化，热源温度从 75 ℃变化到 95 ℃，制冷量从 1.42 kW 变化到 2.2 kW，能量效率从 13.4%变化到 16.8%，火用效率从 18.1%降低到 16.6%。可见两级吸附式制冷的能量效率比 ORC 系统能量效率高，而火用效率却比 ORC 系统的低，因此将两者串联起来补偿各自的缺陷。

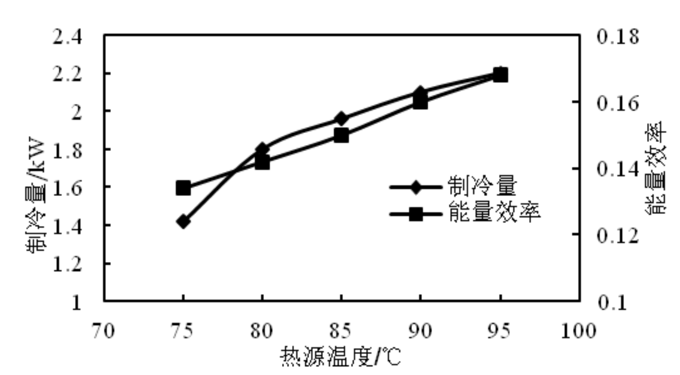



图 9 两级吸附制冷的制冷量及能量效率

Fig.9 Refrigerating capacity and energy efficiency

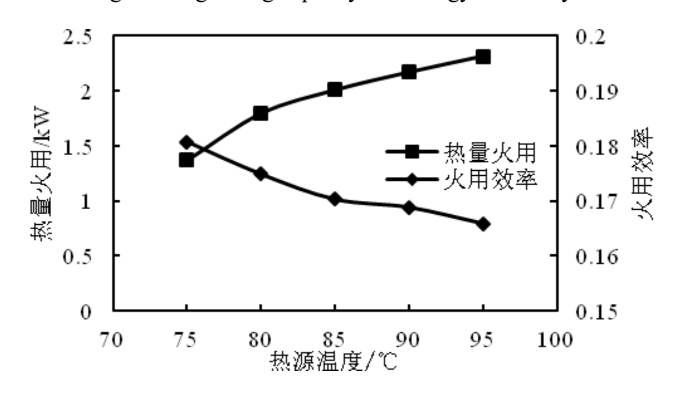



图 10 两级吸附制冷的热量火用及火用效率

Fig.10 Exergy and exergy efficiency of the adsorption system

# 3. 有机朗肯循环与氯化钙/氯化钡两级

吸附式制冷串级连接

考虑到从ORC系统中的蒸发器出来的水温还有较高的温度，该温度足以推动两级吸附式制冷系统，因此将有机朗肯循环与两级吸附制冷串连起来，如图11所示，使用同一个加热器，热水先流经ORC系统，然后在流过两级吸附制冷系统，即用ORC系统中蒸发器出口的热水去驱动两级吸附制冷系统。

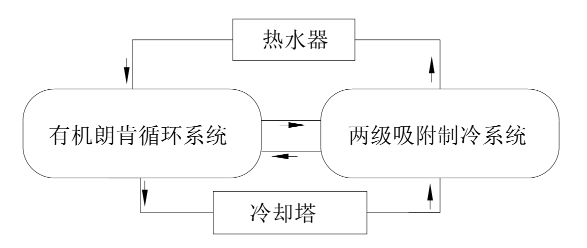



图 11 ORC 与两级吸附制冷的的串级连接

Fig.11 Cascaded connection between ORC and adsorption

串级系统总的能量效率及火用效率：

$$\eta_{total.energy}=\frac{Q_{ref}+W-W_{pu}}{Q_{h1}+Q_{h2}+Q_{h3}} \quad (14)$$

$$\eta_{total,exergy}=\frac{E_{ref}+W-W_{pu}}{E_{ORC}+E_{Qh3}} \quad (15)$$

图 12 为串级系统总的能量效率及火用效率随热源温度变化的关系，热源温度从 78 ℃变化到 98 ℃时，系统总的能量效率从 8.9%增大到 11.8%，火用效率从 25.9%降低到 23.7%。当热源温度是 98 ℃时，发电量为 560 W，制冷量是 2.2 kW。

## 4. 结论

首先进行了 ORC 系统的设计及理论计算，工质选为 R245fa，膨胀机选为涡旋膨胀机；然后针对不同的热源温度，模拟了氯化钙/氯化钡两级吸附式制冷系统的性能；由于两级吸附式制冷系统的能量效率比 ORC 系统的能量效率高，而火用效率却比 ORC 系统的低，因此最后将两者串联起来研究串级系统的能量效率及火用效率。

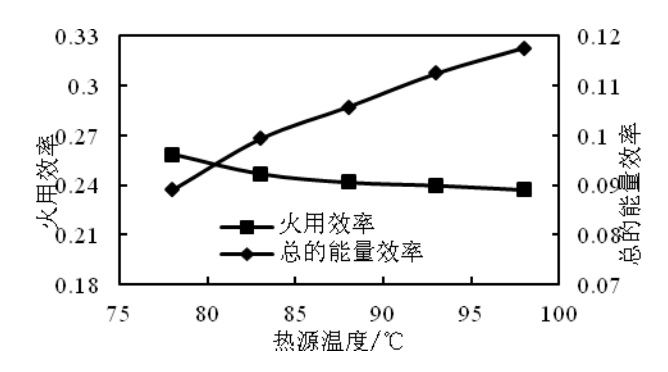



图 12 串级系统总的能量效率及火用效率

Fig.12 Energy and exergy efficiency of the cascaded system

（1）从 ORC 系统的理论计算（假设膨胀机的等熵效率与功电转化效率的乘积是 0.4），当膨胀机进口压力从 0.6 Mpa 变化到 1.1 Mpa 时，能量效率从 3.9%变化 5.5%，火用效率从 34%降低到 31.5%，发电量从 392 W 增加到 600 W；

（2）考虑到 ORC 系统的能量效率比较低，在膨胀机出口和蒸发器入口增加了回热器，当膨胀机进口压力是 1 MPa 时，没有回热器，发电量、能量效率、火用、火用效率分别是 560 W、5.3%、1677 W、32%；当增加回热器，发电量、能量效率、火用、火用效率分别是 560 W、5.7%、1566 W、34.3%；

（3） 利用压缩空气模拟工质 R245fa 推动膨胀机，当进口的压力为 1 MPa 时，膨胀机等熵效率与功电转化效率的乘积是 0.53，发电量为 300 W；

（4）氯化钙/氯化钡两级吸附式制冷系统，当热源温度从 75 ℃变化到 95 ℃，制冷量、能量效率及火用效率变化范围分别是 1.42 kW-2.2 kW、13.4%-16.8%、18.1%-16.6%；

（5）有机朗肯循环与两级吸附制冷串连起来，热源温度为 98℃时，系统总能量效率为 11.8%，火用效率为 23.7%，发电量为 560 W，制冷量是 2.2kW。

**参考文献**

[1] Liu B T, Chien K H, WANG Chichuan. Effect of working fluids on organic Rankine cycle for waste heat recovery [J]. Energy 29 (2004) 1207–1217.

[2] Roy J.P, Mishra M.K, Misra A. Performance analysis of an Organic Rankine Cycle with superheating under different heat source temperature conditions[J]. Applied Energy 88 (2011) 2995–3004.

[3] WANG Ruzhu, Oliveira R G. Adsorption refrigeration-an efficient way to make good use of waste heat and solar energy [J]. Progress in Energy and Combustion Science 32 (2006) 424-458.

[4] WANG Liwei, Metcalf S J, Thorpe R, et al. Development of thermal conductive consolidated activated carbon for adsorption refrigeration. Carbon, 50(2012)977-986.

[5] WANG Liwei, Roskilly A.P, WANG Ruzhu. Solar powered cascading cogeneration cycle with ORC and adsorption technology for electricity and refrigeration[J]. Heat Transfer Engineering 35( 2014)1028-1034.
[6] WANG Jian, WANG Liwei, LUO Weili, et al. Experimental study of a two-stage adsorption freezing machine driven by low temperature heat source[J]. International Journal of Refrigeration 36(2013) 1029–1036.
[7] 王如竹,王丽伟,吴静怡.吸附式制冷理论与应用［M］.北京：科学出版社,2007,124-126. The theory and application of adsorption refrigeration.